

编者按

青藏高原全球气候效应已成为当今国际大气科学领域的研究前沿。2014年,国家自然科学基金委员会启动国家自然

科学基金重大研究计划“青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应”。该研究揭示了青藏高原对全球气候及其

变化的影响机制,将我国青藏高原大气科学研究进一步推向世界舞台,使其实现从并跑到领跑地位的重大突破。

对话“世界屋脊”

——记国家自然科学基金重大研究计划“青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应”

■本报记者 高雅丽

青藏高原平均海拔超过4000米,是亚洲主要河流发源地。其独特的地理位置和复杂的多圈层相互作用,不仅塑造了亚洲季风系统,更对全球能量循环、水分输送和极端天气产生了深远影响。

2014年,国家自然科学基金委员会启动国家自然科学基金重大研究计划“青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应”(以下简称重大研究计划)。在重大研究计划实施的10年时间里,研究人员首次系统揭示了青藏高原如何通过地-气耦合过程调控全球气候,为我国在全球气候变化研究领域赢得国际话语权提供了关键支撑。

重大研究计划指导专家组组长、中国科学院院士、中国科学院大气物理研究所研究员吴国雄告诉《中国科学报》,“重大研究计划将我国青藏高原综合观测、科学理论和数值模式研究提升到新的高度,这不仅是中国科学家对地球系统科学的重要贡献,更彰显了多学科协作攻关、服务国家重大战略需求的科研范式。”

近期,重大研究计划顺利完成评估。

破解“对话密码”

青藏高原作为地球上最年轻、海拔最高的巨型地貌单元,地表过程与大气相互作用的复杂性是国际大气科学研究领域长期的难点。

从20世纪中期开始,我国科研人员针对青藏高原地-气相互作用、大气边界层过程、能量水分循环过程相继开展了数次大规模的综合性和多学科科学试验。

“随着研究逐渐增多,我们发现青藏高原上的观测数据资料实在是太少了。”吴国雄表示,其中一个重要原因是青藏高原地区气象站点少,有效观测数据时段短,特别是高原西部和中部地区观测数据缺乏。海拔高、地形陡峭、下垫面过程复杂、交通和基础设施条件相对落后制约了大规模现场观测。

与此同时,受全球气候变化影响,我国暴雨、洪涝、干旱等极端气候事件频发,严重威胁粮食与水的的生产,影响社会经济可持续发展。因此,开展青藏高原对中国灾害性天气气候变化的影响研究,将提升我国灾害性天气气候预报能力。

最新的观测数据分析表明,在全球变暖趋势下,青藏高原的增暖趋势仅次于北极地区,居全球第二。由于青藏高原海拔高,生态环境较为脆弱,在地表气温快速升高的气候背景下,高原大部分区域出现暖湿化,但高原南部和藏东南出现暖干化,快速改变了冰冻圈和陆



项目组在海拔5200m的珠峰大本营进行探空试验。受访者供图

气相互作用,高原上的生态环境和水资源也发生巨大变化,并对区域乃至全球环境造成了一系列影响。

因此,对于青藏高原地-气耦合过程的科学研究关系到我国以至世界的可持续发展。从2010年开始,来自中国科学院、中国气象局和相关高校的科学家开始思考,如何破解青藏高原与全球气候的“对话密码”?

经过一系列筹备,2014年,重大研究计划启动,围绕3个核心科学问题展开——青藏高原大地形如何调控全球大气环流、高原能量与水分循环如何影响全球气候、高原多圈层耦合过程如何诱发区域灾害性天气。

“重大研究计划通过构建综合观测网络、发展数值模式和整合多学科数据,揭示了高原对全球气候的作用机制,提升了我国在气候预测和灾害防御中的科技能力。”吴国雄说。

“撬动”全球气候

据了解,在以往对于青藏高原的研究中,很多聚焦其对区域天气的影响,而对它在全球气候系统中扮演的角色则存在诸多争议。重大研究计划的实施实现了中国科学家在科学视角的独特性、技术方法的原创性和国际学术影响力等方面的突破。

首先,重大研究计划明确了青藏高原在全球气候系统中的核心作用,特别是对全球能量水分循环的影响,以及对北半球气候的突出贡献,如地面气温升高和大气湿度增加。

其次,重大研究计划增进了对区域气候影

响的深入理解。“研究揭示了青藏高原对周边以及远处地区气候的深远影响,包括通过激发罗斯贝波响应和热力驱动引起的异常纬向直接环流,对上游地区降水和气温的变异产生了影响。”吴国雄说。

此外,重大研究计划在实施过程中,提出了青藏高原对北半球宜居气候以及全球海洋热盐环流建立的关键作用等原创性认识,实现了地球气候形成在理论上的重大突破,发展了地球气候演化理论。

“在重大研究计划实施之前,国外有些研究声称青藏高原没有美国落基山脉对全球气候的影响大,我们的研究成果反驳了上述观点。同时,重大研究计划的实施极大增强了我们数据观测分析的能力。”中国科学院院士、兰州大学大气科学学院教授黄建平说。

针对青藏高原观测数据少的情况,重大研究计划建立了综合观测平台和数据服务共享平台,实现了青藏高原多层次大气物理耦合过程的综合观测,为后续研究提供了宝贵的数据资源。

“我们还开发了具有青藏高原特色的高分辨率全球气候模式和同化分析系统,显著提升了高原极端降水、热带气旋等现象的预测能力。”中国科学院大气物理研究所研究员包庆表示。

吴国雄指出,在重大研究计划实施过程中,一些新的、重大的科学问题被提出与提出,诱发并推动了相关重大科学问题的探索,催生了新的学科前沿与生长点,从而将青藏高原地-气耦合系统研究提升到新高度,确立了

我国在青藏高原观测、理论和模式研究领域的领先地位,并产生了重大国际影响。

突破传统学科界限

在重大研究计划的实施过程中,所有的参与人员都有一个共同感受——多学科交叉与融合是解决重大科学问题的必要途径。青藏高原已经成为多学科交叉融合研究的“天然实验室”。

“这项研究涉及对复杂的多圈层相互作用过程的探索,单一学科和短期研究很难在这一领域取得重大突破。因此,多学科交叉协同研究是在地球科学领域产出创新性成果和实现理论突破的关键。”吴国雄指出。

在顶层设计与布局中,重大研究计划十分注重实质性的学科交叉,集中了我国在地球科学、大气科学、数理科学等领域的优势研究力量,突破传统学科界限的束缚,进行不同学科间有效的交叉融合。

在项目布局上,重大研究计划安排了学科交叉类型的研究项目,其中地-气耦合过程的天气效应类研究项目26项,云降水和平流层-对流层耦合类研究项目19项,地-气耦合与海洋协同效应类研究项目18项,信息融合-资料同化-数值模式类研究项目24项。这些研究项目由多学科科学家共同承担,依靠多学科之间的综合研究与联合攻关解决核心科学问题。

在重大研究计划年度学术会和专题研讨会上,项目交流不进行学科划分,不同学科的项目参与人员相互交流信息与进展、相互开展研讨,取得了较好的效果。

值得一提的是,项目在实施过程中,科研人员的研究视角不再局限于气象学、地质学、地球物理学、生态学等单一学科,培养了一批学科交叉型研究人才,造就了一批具有国际影响力的杰出科学家和进入国际科学前沿的创新团队。

“在重大研究计划的带动下,我国大气科学的多个综合研究团队正在形成,有能力攻克重大的、国际前沿的科学问题。多学科交叉、大团队协作的工作方式,对改变我国目前‘化整为零’易‘化零为整’难的科研局面正产生积极影响,将有力推动我国大气科学研究的快速发展。”吴国雄表示。

重大研究计划倡导的多学科、大团队联合攻关的模式对地球系统科学研究产生积极影响。

从跟跑变成领跑

重大研究计划在实施的10年间,鼓励研

目成果在国际高水平期刊上发表。一批具有国内外重要影响力的成果涌现,使青藏高原地-气耦合过程及其天气气候效应研究成为大气科学研究的国际热点。

在地球学、大气科学、水文、遥感等领域有影响的国际学术会议上,参与重大研究计划的专家学者频繁亮相,并在重要的国际学术会议上设置分会场,大幅提升了青藏高原研究在国际学术界的地位和影响力。

10年间,科学家不畏艰难、持续“接棒”青藏高原研究。吴国雄以耄耋高龄入藏,头发都白了许多。更多年轻科研人员则在老一辈科学家的带领下,投身于对青藏高原的研究。

中国科学院青藏高原研究所研究员马耀明负责建立珠峰地区多圈层地-气相互作用综合观测网络平台。当时3、4月份海拔5200米的珠峰大本营夜晚气温达到零下20摄氏度以下。“我睡在帐篷里,一睁眼看到了满天繁星,原来是高原的风速实在太大了,帐篷顶被直接刮飞了。”回忆起在青藏高原进行实验的日子,马耀明感慨万分。

观测站要在海拔4700米的尼玛县搭建大气边界层塔,需要用铝合金一节一节拼接起来,工作量巨大。“当时连司机和工程师都因为高原反应撑不住了,但我们的女博士依然咬牙坚持,硬是把20米高的塔一节一节地搭建起来。在这样极端的环境下,每一步都充满挑战,而正是这种坚持,才让我们能够获取宝贵的数据,推动科学研究进步。”马耀明说。

“无论是科研能力还是品格意志,年轻人都得到了非常好的锻炼,一系列成果使得我国在青藏高原研究领域从过去的跟跑变成了领跑状态。”黄建平表示。

在重大研究计划结束后,吴国雄依然为青藏高原气候研究规划新方向。研究人员将加强青藏高原对全球气候影响的研究,深化青藏高原对全球气候影响的科学认识,全面探索全球气候系统形成与演变的新机制,寻找以稳定全球气候系统为主要目标的人类保护措施与途径。

“此外,近年来基于大数据分析的人工智能等新技术、新方法在各个研究领域得到了广泛应用,但这些技术不能完全替代物理模型。因此,未来人工智能技术和物理模型的研究须并重,丰富研究手段,提升天气预报和气候预测的能力。”吴国雄说。

未来,中国科学家将继续对话“世界屋脊”,解读青藏高原地-气耦合系统的科学密码,谱写全球气候变化研究的新篇章。

建成首个青藏高原多圈层观测平台

青藏高原因高海拔和复杂的地形,具有显著的动力和热力作用,其高原地表与大气之间的相互作用、大气边界层的发展过程影响了高原及周边地区乃至全球的天气和气候变化。然而,受自然环境和复杂地形的制约,长期以来青藏高原是我国观测数据最为缺乏的地区之一,特别是缺少对青藏高原地-气相互作用过程和水分循环规律的观测和整体认识。

自国家自然科学基金重大研究计划“青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应”实施以来,中国科学院青藏高原研究所研究员马耀明团队建成了首个覆盖整个青藏高原区域的“青藏高原多圈层地-气相互作用立体综合观测研究平台网络”和“珠峰地区多圈层地-气相互作用综合观测网络平台”,涵盖大地形山地、高寒草甸、荒漠草原、高原湿地、高原林地、冰川、雪山以及高原湖泊等典型下垫面。

通过这些平台,研究团队与相关团队一起在未知的青藏高原地-气相互作用过程、大气边界层、对流层和平流层大气层邻域,开展了地-气相互作用过程和大气边界层过程综合观测试验,对流层-平流层相互作用过程观测试验,揭示了高原地-气相互作用过程,大气边界层和中上层大气风、

温、湿、压、臭氧、气溶胶等要素水平和垂直分布及季节变化的规律。

此外,研究团队还推进了高原云物理过程的观测试验研究,构建了首个包含地-气相互作用过程、大气边界层过程、对流层、平流层以及云降水过程的高时空分辨率“青藏高原多圈层地-气相互作用综合观测数据集”,并在全球发布;揭示了青藏高原复杂地表-大气边界层-对流层-平流层的相互作用规律,系统提出了青藏高原星地联合、点-面结合的多圈层立体综合观测研究平台网络,已成为第二次青藏高原综合科学考察研究和“第三极环境计划”的重要支撑,为破解国家重大工程气候应对难题提供了技术支撑。研究团队建立的青藏高原多圈层地-气相互作用高时空分辨率数据集实现了跨行业国际共享,自2020年底数据发布以来,浏览量达到15.2万余次,下载量达到16.8万余次,并支撑了国内外高水平研究成果的产出,为青藏高原乃至全球天气预报和气候预测研究打下了坚实的观测基础。

据了解,研究团队构建的青藏高原多圈层地-气相互作用立体综合观测研究平台网络,已成为第二次青藏高原综合科学考察研究和“第三极环境计划”的重要支撑,为破解国家重大工程气候应对难题提供了技术支撑。研究团队建立的青藏高原多圈层地-气相互作用高时空分辨率数据集实现了跨行业国际共享,自2020年底数据发布以来,浏览量达到15.2万余次,下载量达到16.8万余次,并支撑了国内外高水平研究成果的产出,为青藏高原乃至全球天气预报和气候预测研究打下了坚实的观测基础。

阐明青藏高原影响全球气候的动力过程

研究发现,青藏高原是大气环流的重要驱动源,然而过去对青藏高原气候影响的认知局限于亚洲区域,青藏高原对全球气候是否有影响尚不明确。

在国家自然科学基金重大研究计划“青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应”的支持下,中国科学院院士、兰州大学大气科学学院教授黄建平团队与复旦大学教授杨海军、中国科学院大气物理研究所研究员刘屹岷等多个团队通过新的观测、数值模拟和动力学研究,首次建立了青藏高原影响全球气候的动力学框架。这一突破性成果标志着我国青藏高原大气科学研究实现了从跟跑到领跑的重大转变,并将通过引领研究领域的发展方向,持续将我国的青藏高原研究推向世界舞台。

多个团队协同研究发现,青藏高原通过动力和热力强迫及其对物质循环的调控影响大气环流。这些影响通过罗斯贝波等大气环流过程,激发与全球海洋的相互作用,进而影响古气候时间尺度上的海洋热盐环流,塑造了现代北半球的宜居气候。

研究表明,青藏高原影响全球气候的关键在于3个方面的动力过程:调控大气环流,增强海-气相互作用,塑造海洋环流。其中,大气环

流过程主要由青藏高原感热泵调控的罗斯贝波、西风急流、经向/纬向-垂直环流圈、热量和水汽输送组成。这些大气环流过程调控海-气之间的热量和水汽交换,从而激发海-气正反馈,使得太平洋和大西洋等海域能够放大青藏高原的影响,并进一步向更远的区域传播,即“海洋中继器”效应。

研究人员形象地打了个比方:“如果把青藏高原比作无线信号源,那么全球海洋的一些关键区域则相当于无线信号传输中的信号塔,即‘海洋中继器’。”

在漫长的古气候变迁过程中,青藏高原隆升通过上述大气环流及海-气相互作用过程,改变了大气水汽输送的格局,使得更多水汽集中在亚太地区,从而改变海水密度,使得太平洋经圈翻转流(PMOC)消失、大西洋经圈翻转流(AMOC)建立,增强了北半球的宜居性。

上述研究发表了一系列高影响论文。在研究人员看来,这些成果为人们深入理解青藏高原在全球气候系统中的重要作用提供了新的证据和视角,表明青藏高原研究不仅服务于我国和全球的气候预测,还在气候变化应对中发挥着重要作用。

实现全球气候框架下的高效同化和预测应用

青藏高原作为全球气候系统的关键驱动区,其地-气耦合过程的复杂性对气候预测提出了严峻挑战。在国家自然科学基金重大研究计划“青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应”的支持下,中国科学院大气物理研究所研究员包庆团队与相关团队一起围绕高原观测资料匮乏、再分析质量不足、数值模式性能偏低等核心问题,通过技术创新与系统集成,取得了一系列突破性成果。

研究团队构建了多源陆面数据同化系统,融合卫星遥感、地面观测及数值模式资料,攻克了高原复杂地形下土壤湿度、积雪覆盖等关键参数的反演难题。他们研发的多卫星融合降水反演算法将高原降水产品的准确率提升了20%以上,相关技术获得了5项国家发明专利授权。

在此基础上,研究团队基于降维投影四维变分技术同化方法和FGOALS气候系统模式,研制了全球首套海-陆-气耦合同化系统,实现了青藏高原资料在全球气候框架下的高效同化。这一系统显著改进了印度洋偶极子和北大西洋多年代际振荡等关键气候指数的模拟能力,相关系数达0.355。同时,研究团队构建了多套高精度再分析数据集,包括时空分辨率达6千米的CLDAS陆面同化数据集,涵盖气温、降水、土壤湿度等10类参数,以及青藏高原科学试

验关键区物理协调大气分析数据集,数据总量超1238GB。这些数据集通过共享平台向全球开放,注册用户超3000人,支撑了气候机理研究及中国气象局智能网格预报业务,并在冬奥会、亚运会等国家重大活动中发挥决策支持作用。

针对传统模式在高原的分辨率与物理过程缺陷,团队研发了新一代25千米分辨率青藏高原特色气候系统模式。该模式集成3D地形辐射方案、高原湖泊混合层方案及含根土壤热参数化方案,将东亚夏季风、大气季内振荡(MJO)等气候变率的模拟精度提升了15%,MJO实时预报评分(80分)超越美国CFSv2模式(74分),被世界气象组织纳入全球业务体系,每日提供实时气候预测。该模式参与了第六次国际耦合模式比较计划中的全球季风比较计划,全球能量和水循环组织的“初始化地表温度及积雪对次季节-季节预测的影响”国际项目,数据下载量达601TB,显著提升了我国气候研究的国际影响力。

这些研究成果不仅为“一带一路”、防灾减灾等提供了科技支撑,更标志着我国在地球系统科学领域跻身国际先进行列。未来,研究团队将通过人工智能驱动技术优化与无缝隙预测系统研发,进一步服务全球气候变化应对需求与国家重大需求。